

3. Emoto A., Uchida E., Fukuda T. Optical and physical applications of photocontrollable materials: azobenzene-containing and liquid crystalline polymers // *Polymers*. 2012. Vol. 4. P. 150–186.
 4. Трофимова А. В., Могильный В. В. Кинетика фотонаведенного двулучепреломления в слоях бензальдегидсодержащих полимеров // *Вестн. БГУ. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика*. 2008. № 1. С. 18–22.
 5. Могильный В. В., Трофимова А. В. Фотонаведенное двулучепреломление в слоях бензальдегидсодержащих полимеров и его температурная чувствительность // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2008. Т. 72, № 12. С. 1744–1746.
 6. Могильный В. В., Станкевич А. И., Трофимова А. В. Увеличение эффективности записи фотонаведенного двулучепреломления в бензальдегидных полимерах // *Взаимодействие излучения с твердым телом : материалы Междунар. науч. конф. (Минск, 23–25 сент. 2009 г.)*. Минск, 2009. С. 340–342.
 7. Yaroshchuk O., Reznikov Y. Photoalignment of liquid crystals: basics and current trends // *J. Mater. Chem.* 2012. Vol. 22. P. 286–300.
 8. Управляемые дифракционные жидкокристаллические структуры на основе полимерного фотоориентанта / А. А. Казак [и др.] // *ПЖТФ*. 2008. Т. 34, вып. 20. С. 1–7.
 9. Могильный В. В., Станкевич А. И., Трофимова А. В. Ориентация жидкокристаллического мономера полимерами с бензальдегидными группами // *Вестн. БГУ. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика*. 2014. № 2. С. 17–22.
- Поступила в редакцию 11.09.2014.

Владимир Васильевич Могильный – доктор физико-математических наук, профессор кафедры физической оптики физического факультета БГУ.

Александр Ильич Станкевич – кандидат химических наук, старший научный сотрудник НИЛ нелинейной оптики и спектроскопии физического факультета БГУ.

Александра Владимировна Трофимова – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики физического факультета БГУ.

УДК 621.384.6

В. К. ГОНЧАРОВ, О. В. КРЕКОТЕНЬ, В. В. МАКАРОВ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ МОЩНОГО ИМПУЛЬСНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ СИЛЬНОТОЧНОГО ДИОДНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ С ОСТРИЙНЫМ ЛАТУННЫМ КАТОДОМ И АЛЮМИНИЕВЫМ АНОДОМ-МИШЕНЬЮ

Осуществлена экспериментальная оценка возможности разработки и создания мощного источника импульсного рентгеновского излучения на основе сильноточного ускорителя электронов диодного типа. Для реализации этой задачи была применена схема вакуумного диода со взрывным плазменным катодом из латуни и анодом, выполненным из алюминиевой фольги толщиной 850 мкм. В результате проведенных экспериментов было показано, что для данного металла анода составляющая рентгеновского излучения, распространяющаяся в направлении движения пучка электронов, имеет больший энергетический вес, чем отраженная. В качестве датчика использовалась фотобумага, помещенная в кассету из черной плотной бумаги. Следует отметить, что в настоящее время проводимые исследования носят качественный характер, но при этом удалось определить угол расходимости генерируемого излучения после алюминиевой мишени, он составил $\sim 90^\circ$. Генерация тормозного излучения, а также проведенная оценка его энергии говорят о возможности использования установки как в научных, так и прикладных целях, например контроля радиационной устойчивости различных электронных изделий.

Ключевые слова: взрывной плазменный катод; сильноточный пучок электронов; мощное импульсное рентгеновское излучение; алюминиевый анод-мишень.

The main aim of this article is to assess experimentally the possibility for the development and manufacturing of a high-power pulse X-ray source on the basis of a high-current electron accelerator of the diode type. This task was realized using a vacuum diode with the explosive plasma cathode from brass and an anode of aluminum foil 850 microns thick. As a result of the experiments performed, it is shown that, for this metal of the anode, the component of X-rays, propagating along electron beam motion, has bigger energy weight than the reflected one. The photographic paper placed in a black dense paper holder was used as a sensor. It is necessary to mark that at present the current investigations have a purely qualitative character. At the same time, the authors have succeeded to define an angle of divergence ($\sim 90^\circ$) of the generated radiation after an aluminum target. The possibility of generating bremsstrahlung and also the energy estimates indicate applicability of this installation in pure research, and application-oriented purposes, for example, for monitoring of the radiation stability of different electronic products.

Key words: explosive plasma cathode; high-current electron beam; high-power pulse X-rays; aluminum anode-target.

Работа используемых источников рентгеновского излучения основана на непрерывном механизме генерации от ускоренных электронов, которые взаимодействуют с анодными мишенями из различных металлов: W, V, Cu, Re, Ag и т. д. В данных системах анализ объекта производится за счет длительности воздействия, например от нескольких секунд в медицине [1] до десятков минут при рентгеноспектральном анализе [2]. При этом известно, что и импульсные источники заряженных частиц могут генерировать короткие импульсы рентгеновского излучения достаточной мощности. Существуют, например, стандартные импульсные рентгеновские лампы, способные последовательно от десятков до нескольких тысяч импульсов, в зависимости от свойств исследуемого образца, обеспечить необходимую для исследования дозу облучения [3]. Но их КПД ниже, чем у непрерывных аналогов.

Сегодня импульсные источники мощного рентгеновского излучения применяются в основном для определения порогов выхода из строя элементной базы электронных компонентов изделий военной и бытовой техники [4, 5].

Получение и исследование мощного импульсного рентгеновского излучения – задача достаточно сложная, так как работа ведется при разрядах порядка нескольких сотен киловольт, токах от 0,1 до 10 кА и длительностью импульса от 0,1 до 10 мкс. Высоковольтный сильноточный импульс формируется с помощью воздушных искровых разрядников, которые создают мощные электромагнитные помехи как непосредственно около замыкающихся промежутков и эпицентра основного разряда, так и в прилегающих рабочем и исследовательском пространствах (до нескольких десятков метров). В связи с этим жесткие ограничения накладываются на материал катода, анода и непосредственно рабочего вакуумного пространства, необходимо дополнительное экранирование персонала, а также построение помехоустойчивых систем синхронизации и обеспечение съема полезной информации без наводок с датчиков. Эта многопараметрическая задача имеет непростое, трудоемкое, время- и энергозатратное решение, но ее постановка, оценка полезности и научно-практической выгоды говорят о том, что реализация исследовательской установки, решающей данную проблему, должна производиться несмотря на все трудности. Коллектив авторов данной статьи начал создание подобной установки и наметил основные пути для адекватной оценки основных параметров генерируемого излучения.

Описание экспериментальной установки

В состав мощного импульсного источника рентгеновского излучения входят:

- 1) генератор импульсных напряжений на основе схемы Аркадьева – Маркса с рабочим напряжением от 100 до 500 кВ, с током до 10 кА, длительностью импульса 2–3 мкс;
- 2) ускоритель электронов диодного типа. Энергия электронов до 500 кэВ, ток около 1 кА, длительность импульса 100 нс. Длительность импульса пучка в проводимых экспериментах определяется как расстоянием катод – анод, так и положением стенок кварцевой трубы относительно центра разряда. Основой ускорителя служит взрывной плазменный катод. При подаче на катод высокого напряжения плотность автоэлектронного тока на его краях превышает 10^7 А/см², из-за джоулева нагрева происходит плазменный взрыв катода и образование плазмы, которая и является источником сильного потока электронов. Из образовавшейся плазмы электроны вытягиваются полем анода;
- 3) магнитная система фокусировки и сопровождения сильноточного пучка электронов. Данная система формирует в области генерации и дрейфа электронного пучка квазистационарный импульс магнитного поля со следующими характеристиками: длительность импульса ~4 мс, величина индукции в диапазоне от 0,1 до 2 Тл;
- 4) система синхронизации, обеспечивающая помехоустойчивый запуск высоковольтных частей установки с заданными задержками и их гальваническую развязку.

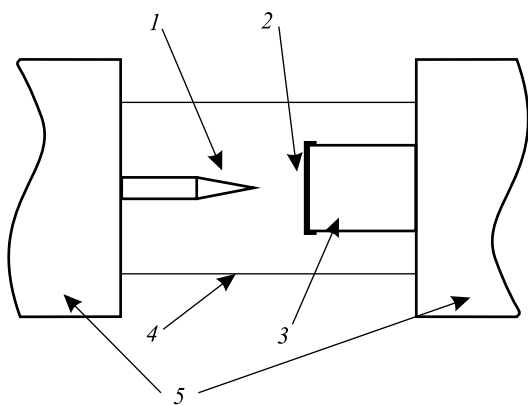


Рис. 1. Катод-анодный узел экспериментальной установки для генерации мощного импульсного рентгеновского излучения: 1 – острый латунный катод; 2 – алюминиевый анод; 3 – заземленный цилиндр из латунного листа 350 мкм для крепления анода; 4 – кварцевая труба, определяющая внешние размеры вакуумного пространства; 5 – капролоновый катодовод и держатель анода

Катод-анодный узел. В процессе работы над решением проблемы генерации мощного импульсного рентгеновского излучения была апробирована экспериментальная установка, в которой применен катод-анодный узел, изображенный на рис. 1.

Острый катод выполнен из латуни, что объясняется технологичностью обработки металла и его дешевизной, а также большим количеством свободных электронов в процессе взрывного плазмообразования. В качестве материала для изготовления анода был выбран алюминий (толщина 800–850 мкм) [6]. Как показали эксперименты, при рабочих напряжениях выше 150 кВ интенсивность боковых лепестков тормозного излучения значительно ниже составляющей, которая распространяется в направлении движения пучка электронов и не фиксируется имеющимися средствами. В связи с этим был выбран материал, формирующий и пропускающий максимальный поток рентгеновского излучения, а именно алюминий. Необходимо также отметить, что если использовать алюминиевую пластину малой толщины (менее 500 мкм), то возможно проникновение части потока электронов через анод, а это влечет за собой искажение результатов по регистрации рентгеновского излучения.

Кварцевая труба для ограничения рабочего вакуумного пространства была выбрана исходя из ряда факторов:

- 1) возможность визуального контроля плазменного разряда;
- 2) высокая пропускная способность кварца в рентгеновском диапазоне;
- 3) контроль разрушения поверхностей катода и анода.

Латунный цилиндр служит двум целям: крепление анода и защита кассеты с фотобумагой от возможной засветки внешними источниками излучения и излучением плазменного разряда, а также электронным пучком.

Оценка мощности и энергии импульса рентгеновского излучения. Для оценки мощности и соответственно энергии импульса рентгеновского излучения был проведен приблизительный расчет исходя из мощности электронного пучка.

Входные данные эксперимента:

- рабочее напряжение – 200 кВ;
- средний ток пучка электронов – 1 кА;
- длительность импульса электронного пучка – 100 нс.

В соответствии с входными данными мощность электронного пучка равна 200 МВт, а энергия – 20 Дж. Основываясь на исследованиях по рентгеновскому излучению, берем за основу, что энергия тормозного излучения составляет менее 1 % от энергии пучка электронов. Получаем, что мощность формируемого рентгеновского пучка ~2 МВт, а энергия ~200 мДж. Как следствие, при достаточно большой мощности генерируемого тормозного излучения малое время экспозиции (~100 нс) ограничивает энергию, воздействующую на образец или датчик, что ставит дополнительные задачи, связанные с детектированием и использованием.

В работе [6] толщина алюминиевой пластины анода была выбрана 500 мкм и эксперимент показал хорошую генеративную и пропускную способность. Однако в наших экспериментах используется более толстый анод (~850 мкм) и нельзя с большой долей уверенности сказать, что пропускная способность не изменяется в зависимости от толщины мишени. Дальнейшие эксперименты могут позволить выявить данную зависимость по изменению степени засветки детектора. На наш взгляд, увеличение толщины уменьшает интенсивность генерируемого рентгеновского излучения, распространяющегося в направлении движения пучка электронов.

Эксперимент

Цель эксперимента – определение направления распространения формируемого импульсного тормозного излучения.

К вышеописанным входным данным эксперимента добавим параметр фокусирующего и сопровождающего электронный пучок магнитного поля, его индукция составляет 0,4 Тл.

Отдельно следует отметить, что при выборе детекторов и анализаторов генерируемого рентгеновского излучения необходимо учитывать импульсный режим работы высоковольтной установки (времена – менее 1 мкс, напряжения – от 100 до 300 кВ), а также наличие мощных высоковольтных помех. Данные факторы не позволяют использовать стандартные устройства анализа, которые обычно применяются при исследовании маломощного и длительного рентгеновского излучения.

Для достижения поставленной цели были применены кассеты из черной бумаги, внутри которых находится фотобумага. Одна из кассет, в форме длинного прямоугольника 75×15 мм, располагалась вдоль кварцевого цилиндра на его поверхности и захватывала пространство как до, так и после анода, вторая кассета размером 40×40 мм находилась непосредственно за анодом. Между анодом и кассетой была вставлена свинцовая фольга с прямоугольной прорезью 5×25 мм. Для увеличения времени экспозиции на фотобумагу эксперимент повторялся 10 раз без изменения параметров. Результаты эксперимента представлены на рис. 2.

Из анализа изображений на рис. 2 видно, что боковые лепестки не фиксируются даже при десятикратном повторении эксперимента, но при этом хорошо прослеживается рост засветки фотобумаги, расположенной за анодом, при сравнении однократного эксперимента и его 10 повторений. На рис. 2, в, начинает выделяться центральное пятно воздействия и проявляться прямоугольник, сделанный в свинцовой вставке. Исходя из этого, можно сделать вывод, что основная часть энергии сконцентрирована в составляющей генерируемого рентгеновского излучения, которая распространяется в направлении движения пучка электронов.

Проведена также серия экспериментов по определению угла расходимости, генерируемого в процессе эксперимента рентгеновского излучения. Для этого непосредственно за поверхностью анода был установлен свинец толщиной 1 мм с круглым отверстием в центре диаметром 1 мм. Кассета

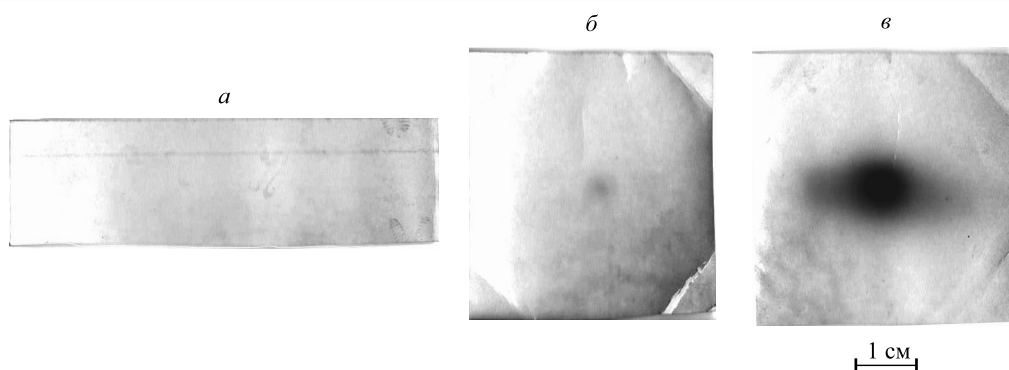


Рис. 2. Фотобумага после воздействия рентгеновским излучением, регистрирующая: *а* – боковое тормозное излучение (10-кратная экспозиция); *б* – рентгеновское излучение, распространяющееся вдоль направления движения электронного пучка (1-кратная экспозиция); *в* – рентгеновское излучение, распространяющееся вдоль направления движения электронного пучка (10-кратная экспозиция)

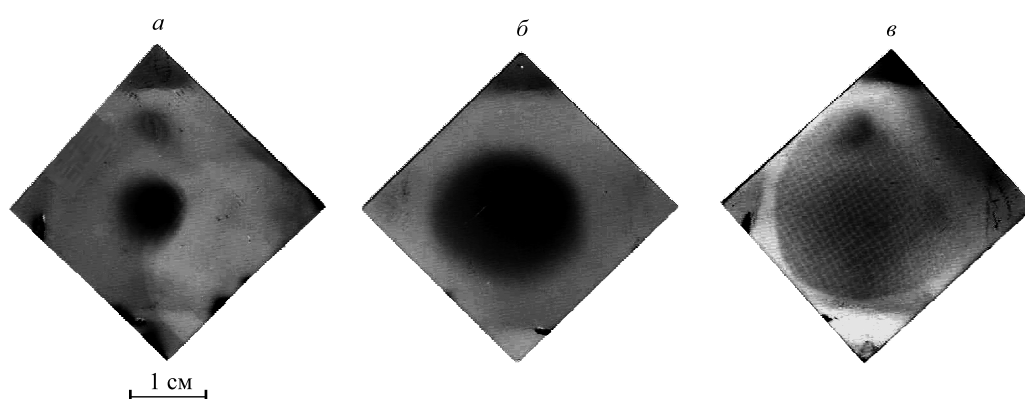


Рис. 3. Фотобумага после 10-кратного воздействия рентгеновским излучением за анодом, регистрирующая: *а* – тормозное излучение непосредственно после свинцовой диафрагмы диаметром 1 мм, поставленной за анодом; *б* – рентгеновское излучение на расстоянии 9–10 мм от анода; *в* – рентгеновское излучение на расстоянии 12–13 мм (вплотную к фотобумаге прислонена сетка из медной проволоки)

с фотобумагой устанавливалась поочередно на трех позициях: 1) непосредственно за свинцом (расстояние свинец – фотобумага составляло 1–2 мм); 2) на расстоянии 9–10 мм; 3) на расстоянии 13–14 мм (дополнительно перед фотобумагой помещалась медная сетка с шагом порядка 1 мм).

Исходя из результатов, представленных на рис. 3, можно сделать вывод о том, что основная часть излучения имеет угол расходимости $\sim 90^\circ$.

На рис. 3, *в*, видно, что на фотобумаге достаточно детально просматривается медная сетка, поставленная непосредственно перед ней. В качестве дополнительного эксперимента была применена следующая схема расположения медной сетки: ее удалили на 1–2 мм от фотобумаги. В результате изображение сетки исчезло и перешло в серое пятно. Исходя из этого, можно сделать следующее предположение, что источник не является точечным, а представляет собой хаотичный конгломерат микроисточников рентгеновского излучения, каждый из которых имеет свою диаграмму направленности, и это не позволяет получить увеличенное изображение сетки. Если же попытаться уменьшить отверстие в свинце до размера единичного источника, то, скорее всего, его мощности будет недостаточно, чтобы засветить фотобумагу за адекватное количество разрядов.

Таким образом, по итогам эксперимента получены следующие результаты.

Разработана и создана экспериментальная установка на основе диодного ускорителя электронов, позволяющая получать и исследовать мощное импульсное тормозное излучение, состоящее как из боковых лепестков, так и составляющей, которая распространяется в направлении движения пучка электронов.

Сделана оценка выходной мощности генерируемого тормозного излучения с учетом входных рабочих энергетических параметров установки.

Показано, что в случае использования в качестве анода алюминиевой пластины толщиной 800–850 мкм отсутствует или имеет малую энергию боковая часть генерируемого импульсного тормозного излучения,

а составляющая, распространяющаяся в направлении движения пучка электронов, при 10-кратной экспозиции уже достаточно четко отображается на фотобумаге.

Экспериментально показано, что угол расходимости основной части генерируемого тормозного излучения составляет $\sim 90^\circ$.

На основании результатов исследования сделано предположение, что источником излучения является конгломерат не коррелированных между собой микроисточников, что и приводит к невозможности получения увеличенного изображения облучаемого объекта.

В настоящее время данную установку можно использовать не только в научных целях, но и для создания устройства контроля устойчивости различных электронных изделий к импульсному рентгеновскому излучению.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ильясова Е. Б., Чехонацкая М. Л., Приезжева В. Н. Лучевая диагностика : учеб. пособие. М., 2009. С. 28, 29.
2. Лосев Н. Ф., Смагунова А. Н. Основы рентгеноспектрального флуоресцентного анализа. М., 1982. С. 152–161.
3. Морговский Л. Я., Пеликс Е. А. Импульсная рентгенография. Аппараты серии «Арина». СПб., 1999.
4. Малогабаритные высокопроизводительные ускорители АРСА для оперативных испытаний на радиационную стойкость ЭКБ / С. Л. Эльяш [и др.] // XIV Харитоновские тематические научные чтения: мощная импульсная электрофизика : сб. докл. междунар. конф. (Саров, 12–16 марта 2012 г.). Саров, 2012. С. 117–121.
5. О перспективах генерации мощных импульсов МРИ на установке «ГАММА» / Н. В. Завьялов [и др.] // XIV Харитоновские тематические научные чтения: мощная импульсная электрофизика : сб. докл. междунар. конф. (Саров, 12–16 марта 2012 г.). Саров, 2012. С. 153–160.
6. Гоголев А. С., Черепенников Ю. М. Определение оптимальных параметров источника рентгеновского излучения на базе малогабаритного ускорителя электронов // Изв. ТПУ. 2012. Т. 320, № 2. С. 35–38.

Поступила в редакцию 15.09.2014.

Виктор Константинович Гончаров – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией лазерной плазмодинамики НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко» БГУ.

Олег Владимирович Крекотень – старший научный сотрудник лаборатории лазерной плазмодинамики НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко» БГУ.

Валентин Владимирович Макаров – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории лазерной плазмодинамики НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко» БГУ.

УДК 535.37

В. И. ПОПЕЧИЦ

ВЛИЯНИЕ ПЕРОКСИДА ВОДОРОДА НА ЦВЕТСТОЙКОСТЬ РАСТВОРОВ ОРГАНИЧЕСКИХ КРАСИТЕЛЕЙ

Исследовано влияние пероксида водорода на цветостойкость растворов органических красителей. Показано, что значительное падение интенсивности поглощения в зависимости от времени хранения (высокий фединг) наблюдается у водных растворов с добавлением H_2O_2 , содержащих красители: малахитовый зеленый, бриллиантовый зеленый, фуксин основание, флуоресцеин и др. Наиболее устойчивы к воздействию пероксида водорода (низкий фединг) водные растворы красителей: конго красный, ланазоль оранжевый, кислотный желтый светопрочный, метиловый оранжевый, родамин С, кислотный зеленый антрахиноновый H2C, кислотный ярко-голубой 3, трипафлавин и др. Определены растворы красителей, наиболее перспективные для применения в качестве детекторов радиационной дозы.

Ключевые слова: фединг (выцветание) растворов красителей; пероксид водорода; цветостойкость растворов красителей.

The effect of hydrogen peroxide on color stability of organic dye solutions is investigated. It is shown that a considerable decrease in the intensity of absorption depending on the shelf-life (high fading) is observed for water solutions with the addition of H_2O_2 containing dyes: malachite green, diamond green, fuksin alkaline, fluorescein and others. The aqueous solutions of dyes most resistant to hydrogen peroxide (low fading) are as follows: congo red, lanazol orange, acid yellow fast light, methyl orange, rhodamine C, acid green anthraquinone H2C, acid bright blue 3, trypanflavine, etc. The dye solutions most promising for applications as radiation dose detectors are proposed.

Key words: fading of dye solutions; hydrogen peroxide; colour fastness of dye solutions.

Растворы органических красителей в органических и неорганических растворителях, а также в полимерных матрицах имеют интенсивные полосы поглощения в видимой области спектра [1–3], что определяет возможность их применения в качестве детекторов радиационной дозы. В работах [4–6] было показано, что под воздействием рентгеновского и гамма-излучения жидкие и твердые многокомпонентные растворы красителей изменяют цвет. Изменение цвета раствора зависит от исходной концентрации и химической природы красителей, физико-химических свойств растворителя, спектрального состава и величины радиационной дозы воздействующего на раствор ионизирующего излучения.

В идеальном случае многокомпонентные растворы красителей, используемые в качестве визуализаторов ионизирующего излучения, должны иметь достаточно высокий радиационно-химический выход,